



TITLE:

星のエネルギーの源泉

AUTHOR(S):

エツヂントン, A. S.; 荒木, 俊馬

CITATION:

エツヂントン, A. S. ...[et al]. 星のエネルギーの源泉. 天界 1926, 6(67): 399-413

ISSUE DATE:

1926-07-25

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/160574>

RIGHT:

星のエネルギーの源泉

ケムブリッジ大學教授 A. S. エツギントン

理論天體物理學の第一人者として吾人が尊敬する英國ケムブリッジ大學教授エツギントン博士が去る三月一日にロンドン大學キングス、カレッジに於いてなした講演が近頃手許に到達した Nature 紙上 (Supplement to No. 2948) に發表せられて居る。此の問題は最近の天文界に於ける最も重大な問題であり、而も天文學丈けの問題に係はるのみならず、廣く一般物理學の根本問題にも關して居り、理論上非常に興味ある問題であるから茲に全譯する事にした。エツギントン教授の論文が天界紙上に紹介せられるのは此の文をもつて始めとするが、若し以下の文章に於て不備な點がありとするならば、それは譯者の拙文に罪を歸すべきものである事を御承知願ひたい。然し幾分でもエツギントン教授の名文が、これに依つて覗はれるならば、譯者の喜びは大きい。
(荒木俊馬譯)

星が次第に收縮するに際して出る重力エネルギーでは、到底星の巨大な輻射量が説明出来ないと言ふ事は、近頃次第に認められて來た。ヘルムホルツ及びケルビン卿の收縮説に依れば、太陽の壽命、從つて太陽系の壽命に關して、何某かの計算が出来るけれども、此の説に依つて出した壽命は、あまりに短かすぎる。最近の研究結果からケルビン卿の計算をやりなをして見ても、その壽命の長さの桁数を變ずる事は到底出来ない。現今の状態に在つては、收縮説に依れば、太陽光球の温度が3300度の下る迄の時間を計算して、四千六百萬年乃至千九百萬年にしかない。此の價でもなを大きく見積り過ぎて居る位で實際はもつこ小さい。何となれば、此の計算には、電離のエネルギーとして星の内部に残つて居るエネルギーは計算に入つて居ないからで、若し之れを勘定に入れば、輻射だけに費やされるエネルギーはもつこ小さくなる。

物理學的並びに地質學的論證によれば、地球の壽命がもつこ遙かに永いと言ふ事は殆んど決定的の者ぞ考へられる。而もこの地球の壽命と言つても、決して吾が地球と言ふ遊星の創世からの時間ではないのである。古い岩石をその中に含まれて居るウラニウムと鉛との比から研究して見るに、一般に十二億年も存在して居たぞ考へられる。すつこ短く見積つたジョイ教授の價でも、收縮説に合ふやうに短かくは出て居ない。ケルビン卿の太陽壽命の長さがもつこ遙かにのばさねばならぬと言ふ事は、月地球系の進化の理論からも要求せられるし天文學的方面では、セフエイド變光星の現象も又同じ事を要求する。若しセフエイドが重力收縮に依るエネルギーの外に何等のエネルギー源泉をも有たないとするならば、それに依つて、其の密度が次第に大きくなつて行く速さが計

算出來、從つて、其の脈動週期の短縮の割合が計算出来るわけであるが、その結果は、觀測に依つて赦されるよりも遙かに大きな變化の割合となる。これに依つて見れば、少くともセフエイド時代にあつては、星辰進化は、收縮説に依るよりも百分の一も遅く行はれて居なければならない。勿論此の議論はセフエイドの脈動説に基いて居るけれども、セフエイド論に關する反對説であつてもセフエイドの變光週期が、其の星固有のものであれば、振動週期であるとか、廻轉週期であるとかを問はず、やはり以上の議論はあてはまる。

要するに太陽の壽命として、少くとも 10^{10} 年の時間が必要であつて、 10^9 年以下に引下げる事は到底出来ないやうである。故に此の長い時間の間太陽或は星の輻射熱を保たしめる爲めには、何かもちよ豊富なエネルギーの源泉を考へねばならない。然らば何に此の源泉を求めるか。吾人は直ちにその範圍を狭める事が出来る。即ち、星の深き内部に熱が発生するものを考へないならば、到底有效な源泉を見出す事は出来ないのである。問題の難點は單に表面に於ける輻射エネルギーの補給だけではない。重力によつて星の物質が中心に向つて縮んで仕舞ふのを支へる爲めに必要な、星辰内部に於ける熱を如何にして保つ事が出来るかも説明しなければならぬ。太陽が現在のやうな膨脹状態にある爲めには、その表面の六千度から中心の四千萬度までの温度の傾斜を支えるだけの熱量が星の内部に存在して居なければならない。若し此の中心から表面に到る現在の温度の傾斜が保持せられなかつたならば、太陽は收縮して、速かに次の状態に進化せねばならぬ。明らかに表面に何某かの熱を供給する事に依つて此の温度の傾斜を支へる言ふ事は出来ない。今此の一年間に太陽が隕石の集團に出遭つたとし、それ等の隕石が太陽に落ち込む事に依つて丁度一年間に太陽が出すエネルギーを供給したにしても、それは太陽の壽命を一年間、否一日も延す事は出来ないであらう。太陽の内部に於ける状態がこれに依つて變更される言ふ事は全然なく、唯太陽が此の一年間に、普通の二倍だけの輻射量を四方に送り出す言ふ事に止まるであらう。

星の中心部に於て、何か外部的なエネルギーの源泉を想像する事は勿論出来ないから、星が、それ自身、自然にそのエネルギーを得る言ふ考へは當然の事のやうに思はれる。從つて、星はその内部に、その餘命を保つだけのエネルギーを隠し有つて居る。然し此のエネルギーがまんま隠れおほせる事が出来るやうか。仲々。今日の學問の立場から見れば、これ等のエネルギーは自分自身で裏切つて居る。何故かと言ふに、エネルギーは質量を有つて居る。いや、語を換えれば、エネルギーは質量なのである。 9×10^{20} エルグのエネルギーは一瓦の質量を有する。そして此のエネルギーは天文學上の方法で決定される星の質量としてはかられて居るのである。 1.8×10^{34} エルグのエネルギーは 2×10^{23} 瓦

の質量を有する。所で此の質量が太陽の質量である。故に此だけのエネルギーが太陽のもつて居るエネルギーの全量である。然らばこれだけの全エネルギーのうちのどれだけが輻射エネルギーに變ずる事が出来るかは、吾人は知らない。然し若し此の全エネルギーが、全部輻射エネルギーに利用する事が出来るならば、太陽の輻射は現今の状態のまゝ續くものとして、15兆年間も續く事が出来るのである。上の議論を他の言葉で言へば、太陽は毎年 150兆噸づつの質量を輻射して居るわけで、若しこれだけづつの質量の損失が年々續くならば15兆年の後には太陽の質量がなくなつて仕舞ふと言ふ事になる。

原子内に潜むエネルギー

此のエネルギーの蓄積は、原子と電子との構造のエネルギーであつて、語を變へて言へば、原子内エネルギーと言ふべきものである。ケルビン卿の時間の尺度が不適當であると言ふ事を許容し、エネルギーの源泉が外部から来るものでないと言ふ吾々の論證が眞でありとし、質量及エネルギーの保存率が間違いないとするならば、エネルギーの源泉は原子内のものでなくてはならない。何となれば、吾人はその他のものはみな除けて仕舞つて居るからである。此のエネルギー蓄積の大部分は、電子とプロトンとが構成される場合に潜んだエネルギーであつて、此の電子とプロトンとが互に虚無に歸する時でなければ遊離する事は出来ない。電子とプロトンとは相互に運行し合つて居り、其の荷電は互に相しく陰陽になつて居り、エネルギーを運び去るものとしては、電磁波として四方に傳はるエーテル内に於ける飛散傳播の他に何等存在するものがないと考へねばならない。此の事の可能性は永い間、單に氣に入つた一つの想像にすぎなかつた。私自身に就いて言へば、私は此の可能率を始めて、ラルモールの『エーテルと物質』(1900)と言ふ本で見た。その本の中には、エーテルの中から一つの管を切り離して、それをいつまでも振つた儘にして置く事によつて、如何なる有様に電子とプロトンとが創成されるかが描かれてあり、そしていつか此の管の振れが、もともとの事があるかも知れないと言ふやうな事が、注意深く暗示されてある。これは一つの考へであるが、エネルギーの貯への一部分——恐らく小部分で充分であらうが——は、かほまで強烈でなくても、もつと弱い過程、例へば元素の變換と言ふやうな事で實現する事が出来る。ヘリウム原子が、プロトンと電子から構成せられる場合には 0.8%の質量、從つて 0.8%のエネルギーが消えて仕舞ふ。若し此の元素の進化が、星の内部に起るならば、かくの如くして出て来るエネルギーは、吾々が今探して居るエネルギーの源泉であるかも知れない。

プロトンと電子のエネルギーの、いくらかの部分が、プロトンや電子との放電消滅なしに、生ずる事が出来ると言ふ結論は、アストン博士が1920年に質量

分光器をもつてした研究に基く。アントンは次のやうな事を證明した。化學元素の原子量が整数と異なつて居る言ふのは、一般に元素が、多くのイソトープの混合物である爲めで、一つ一つの原子の重さは、酸素を16とする時には、みなほんざ整数に依つて與えられる。然しながら水素原子の場合には、小さくはあるが決して聞き捨てならぬ食ひ違ひがある。即ち 1.008 であつて之れは正確に 1 ではない。此の事は、プロトンは水素に於ける如く、孤立して存在する場合には 1.008 と言ふ質量を有するけれども、ヘリウムと其他の元素に於けるが如く、電子と共に相集つて核を作る場合には、其の質量が 1.000 となる言ふ事を示すものである。此の差は疑いもなく、陽電荷と陰電荷と近く持ち來たす場合の普通の靜電氣學的エネルギーの減少をあらはして居る。そして普通の電磁氣學の法則に依れば、此のなくなつたエネルギー(質量)は輻射して運び去られねばならない。故に若し星の中に於てヘリウムが作られつゝあるならば、輻射エネルギーの補給は、恐らくその星の熱を支へるに充分なだけ出されて居り、そして星の質量は次第に輻射されて行くけれども、プロトンと電子の總数は減少しない。此の假説は1920年にペラン教授と私が好んで考へたのであるが、然しその後色々考へて見るに、さうしてもその蓋然性を強める事は出来ない。

もつと高次の元素の進化の階段にあつては、比較的遙かに少ないエネルギーしか放出せられない。故に全エネルギー蓄積の1%より多くは放出せられない。而もそれはそのはじめに星の物質が全部水素から成立し居たものご考へる時の話である。輻射論に關する多くの仕事に於ては、水素が過剰な割合に存在しないと言ふ但書は別として、星の化學的成分に關して何等特殊な假定を設ける必要はなかつた。水素だけは他の元素とは非常に違つた結果を與える。故に随分奇妙な事であるが、星の内部に於ける化學的成分に關して吾々が有つて居る斷片的知識は此の重要な問題に係つて居るのである。思ふに、最も若い星に在つても、水素が其の10%以上の割合で混じて居ることは考へられない。かくして元素の進化は星が未だ星雲の時代にすでに行はれて居たこと考へられるであらう。故に此の場合にあつては、全原子内エネルギーの千分の一以上は元素の轉換に依つて放出されない。そして、過去及未來に於ける太陽の壽命は 1.5×10^{10} 年と言ふ程度のものになる。此の期間は不適當でないかも知れない。けれども少々窮乏である。若しもつと長い期間を必要とするならば、さうしてもプロトンと電子とが放電して虚無に歸する言ふ假説を設けねばならぬ。故に問題は此の二つの假説即、原子の轉換か物質の無くなる事か、いずれが星辰のエネルギーの重なる支持になつて居るかと言ふ事になる。

最近まで、星辰エネルギーの源泉の問題は、唯だ、壽命と言ふ事に關連して重要なだけであつた。そして、それが 10^{10} 年の程度のものであつても、又 10^{13}

年の程度のものであつても、それを決定する、さしせまつた必要もなかつた。然し1916年に、私が輻射平衡論に関する種々の研究を始めて以來、星の内部に於ける各部分に於けるエネルギー源泉の分布の割合に關して、何某かの假定をせねばならぬと言ふ事になつたので、吾々の問題は非常にさしせまつたものになつたのである。此の分布はケルビン卿の理論に依つて決定的に計算する事が出来るであらう。然しケルビン卿の理論はすでに廢れて居る今日では、かくの如き根據に立つて計算を進める言ふ事は、何等の興味もない事である。合理的な範圍に於て、エネルギー源の分布は、色々な結果に、極く小さな影響しか及ぼさないと言ふ事がわかつた。そして問題は今や第二の近似の状態にまで移される事が出来るであらう。然し未だそこまでは試ろみて居ない。すでに1924年の始め次のやうな結論に依つて問題は愈々高められた。即ち星辰進化の在來承認せられて居た理論がちがつて、完全瓦斯の條件は、倭星に於てもみたまされてゐる。今や、如何なる新しい星辰進化論の理論も原子内エネルギーの法則と密接に結びつかねばならぬと言ふ事は明白な事になつた。

星辰進化の問題

星が集中して居る、或る統計的軌跡——即ち、眞光度及スペクトル型のダイヤグラム上に於ける一つの曲線——がある事は周知の事柄である。此の軌跡を平均星の進化の道行であるとするのは、星辰進化論に於ける巨星倭星論の功績であつた。原子内エネルギーの放出の如何なる任意の變化も星をして此の道行上に於ける他の位置に動かせるであらう。故に、原子エネルギーの法則は進化の速さ即ちその時間の尺度を決定する唯一の決定的のものであつた。然し此れ等の法則は道行を決定しない。新しい決論は、統計上の軌跡の此の説明を成立させない。原子エネルギーの放出に於ける任意の變化は倭星を其の進化の道行からそらすであらう。故に吾人はかくの如き原子エネルギー放出の任意の變化を考へる事は出来ない。即ち、語を換えて言へば、若し、上記統計的軌跡を了解せんとするには、原子エネルギー放出を支配する法則を考へねばならぬ。

特に、吾人が星の光度と質量との間に發見した密切な關係は、星の質量が其の一生の間に著るしく減ずる事を赦す事が出来なければ、光の強い星から光の幽かな星への、如何なる進化をも排斥する。巨星倭星説のみならず、それ以前の説に於ても、B型及A型の光の強い星から、倭星の列を通つてM型の幽かな星に進化して行くと言ふ事は其の根本的の假説であつた。此の考へに動搖を來さぬやうにする爲めには、星の質量が著るしく減少する事、従つて物質が無くなつて行くことを假定せねばならぬ。此の見地からすれば——これは天文學者達にとつて最も實際的に關係して來る事であるが——此の物質の消失の假定は實際最も保守的なものである。此の見界は必ずしも此の假説を眞であるとはしな

いけれども、然し非常に厳密にそれを研究せしめる。

是が輻射とは異なつた方法で星の質量を變化する事は可能である。然し此の輻射とは別な變化は恐らく非常に小さいであらう。可成りの確さをもつて、星が、空間に瀰漫する物質から其の質量を増加する分量の上限にあたりをつける事が出来る。然し此のものは、輻射による物質の損失をこりもぎすには非常に少さ過ぎる。又星から物質が逃げて行くのも非常に少ないに違いない。私の計算に依れば、太陽が、其の輻射によつて失ふだけの質量を失ふ爲めには、太陽の色圏は 100 軒の速さで絶へず外に逃げて行かねばならぬ。言ふ必要もないが、かくの如き物質の外流は、ドップレルの法則で測る事が出来ねばならぬ。故に私は思ふに、星が質量を失ふ速さは、其の輻射量に等しいとする事が出来る。故に、原子エネルギーに關する關係には全く無關係に知れて居る量である。そして、唯一の問題と言ふのは、星の壽命が此の質量の損失に對して、星辰進化論の決定的事實である爲めに充分であるかきうかと言ふ事である。若し星の壽命が、物質の損失が其の 1% 以上になるならば、プロトンと電子とは當然消失しなければならない。

私は、多くの物理學者は、此の原子内エネルギーの問題を、單に幻想的想像を考へて居るやうに思ふ。然し天文學者にきつては全くそうではない。一度、星が重力收縮説によるよりも遙かに遅く進化して行くものである事を赦すならば、原子内エネルギーの生産の測定は、天文學上最も普通に測定の一つ即ち星の熱と光との測定である。天文學者が此等の測定を、星の中の物質の温度や、密度や壽命と如何なる關係にあるか、其の間に何某かの關係を出す事を企てる事なくして進めて行く事を欲しない事は自然の事である。若し物理學者が、彼の實驗室に於て、エネルギーの何かわからぬ源泉や、彼等が測定する事の出来るエネルギーの産出や、彼等の決定する事の出来る物理學的條件をもつ事が出来るならば、彼等はその現象の原因なり法測を想像する事に於て決して、そんなに遅れては居ないであらう。原子内エネルギーに關する天文學上の研究はこれよりも一層直接でないと言ふ事は決してないのである。そして、觀測の材料を秩序だてる事を試みる事が未だ成功して居ないにしても、問題は他の如何なる實驗の結果の歸納よりも、より想像的であると言ふ事は決してないのである。

エネルギー源泉如何に汲み盡され行くか。

扨て、吾々は今、觀測事實に於て、むつかし點を二三しらべて見やう。即次の事を考へる。

太陽は其の質量の一瓦毎に毎秒 2 エルグのエネルギーを放出して居る。然るにカペラの質量はその一瓦毎に毎秒 58 エルグのエネルギーを放出して居る。

太陽はカペラより、其の密度に於て 623 倍、其の内部の温度に於て 3.7 倍だけ大きい。

若しも、密度及温度が、原子内エネルギーの放出に何等かの影響を與えるものとするとすれば、たしかにそれ等はエネルギーを即進するに違ひない。特に密度は、如何なる過程に對しても、其れに係つて居る成分を密接せしめる。然るに太陽はカペラよりも大きな密度と高い内部温度を有して居るにもかゝらずカペラよりも少くないエネルギーを放出して居る。私は思ふに、之れに對する唯一の答は、太陽がすでに消耗して居る言ふ事である。いや太陽はその衰えたエネルギーの放出を即進する爲めに高い温度、大きな密度に向つて進んだのである。太陽は明らかに、より年老いた星である。かくして、吾々に必要な問題は、エネルギー源の汲盡度である。

扨て、カペラの二つのコンポーネントを考へて見やう。即ちカペラは一つの星が二つに別れたのであつて、質量と光度との關係を示す法則に依つて、其の重い方のコンポーネントは軽い方のコンポーネントよりもより大きなエネルギーを放射して居るし又過去に於てもして來た。依つて重い方は軽い方よりも、エネルギーの供給をより多く使い盡したわけである。然るに、質量の大きな主星の方が、より多く汲み盡されて居り、よりひくい温度にあり、より小さな密度にあるのに、其の質量の各一瓦が出すエネルギーは、伴星のそれよりも大きいのである。

若し分裂以來まだ十萬年たらずであるとするならば、兩コンポーネントがまだ常定の狀態に達して居ない言ふやうな事が主張されるかも知れない。かかる場合には、原子内エネルギーの放出が、觀測された輻射と丁度等しくないであらう。然しながら、カペラの場合は一般の分光聯星の典型的なものであるがかかる分光聯星は非常に澤山あるので、これ等が、みな、そんなに新しく分裂したものとは到底考へられない。然しながら、食變光星の多くにあつては、光の弱い伴星の方が、温度が低い。従つて、其のエネルギーの產出高の少ない事が説明せられる。これ等、食變光星は、其の兩分星が非常に接近して居る聯星であり、時としては相接觸して居る言ふ様なものもあるが、これ等の星の分裂は多分、新しい時代のものであらうと思はれる。だから、新しく生成された言ふ事の爲めに、前に言つたやうな例外的な性質があるとするならば、それは正にかくの如き食變光星の場合にこそあるべきであらうが、それはゆるし難い。

ジーンズは此の事を説明する爲めに次の如く考へた。即ち、分裂が起る時には、重い方の分星は、そのもこの星の中心部から出來たであらう。そして其の中心部にはより多く、エネルギーの源泉に富んだ重い元素が、集中して居るであらう。此の説には二つの反對がある。第一は、私が計算し得る範圍では巨

星時代を通じて、その星の内部に於ける擴散作用は、重い元素と軽い元素とを著るしく、中心部と外側とによりわけゝる事が出来ない。第二には、星の回轉運動は其の内部に循環氣流を起し、星内の物質を常にかきまぜるやうに作用する。此の後の方の決論は、フォン、ツァイペルの理論に基いて居り、それに対してジーンズは批判を試みて居る。然し、私はフォン、ツァイペルの考への方が正しいと思ふ。故に、星が分裂した時には、その兩分星の内部構造は同じであるを考へるのは合理的であらう。

この第二の論證に關しては、その攪亂作用の效果に就いて、或る疑ひが起るかも知れない。即ちそれは、循環氣流が、層を成すやうになつて來ると言ふ様な事がありそうに思はれるからである。私は思ふに、粘性のある液體內に於ては、渦卷運動は次第に層々に分れて來ると言ふ傾向をもつて居る。故に、星は二つ或は三つの球殻に分れて居り、その各層に於ては、充分にまざり合つて居り、一つの層と他の層とで、それ以上の混合がないやうになつて居るのかも知れない。然し、よしんばそうであつても、私は一般的な混合作用が全くやんでしまふであらうとは思はない。逆の作用をなす擴散作用は非常に遅々たるものであつて、重い元素と軽い元素とが分れるには少くとも 10^{13} 年を要する。カペラが分裂して以來の年数は 10^{11} 年よりも、ずっと長くはないであらう。更に又、質量の小さな星にあつて、重い元素が中心部に沈んで行くと言ふ傾向があつても、カペラのやうに、非常に質量の大きな星にあつては、此の傾向は反對に働く様に見える。即ち、物理學的の理論に依れば、最も重い元素は、最も大きな吸收係数を有して居り、従つて最も大きな輻射壓を受けるのである。重力の場及電場が、輻射壓と相互作用して、奇妙な結果になる。従つて、カペラに在つては、最も重い元素は、水素及ヘリウムと共に表面に向つて流れ、他の軽い元素は逆に中心部に向つて流れて行くであらう。

主 系 列

扱て、『主系列』の星に移らう。主系列は、O 型及 B 型の星から、M 型の矮星までひろがつて居る。星々の最も多くは、此の系列に屬する。故に主系列は、先づ星の生涯の大部分に相等すると言つてよい。巨星時代は、一時的の時期のやうに思はれる。この巨星の時期にあつては、非常に旺んな、然しすぐに盡きてしまうやうなエネルギー源がある。此の巨星の時期が終るに、星は主系列に入り、ついに其のエネルギーの主な源泉が涸れるまで、其の系列に停つて居る。此の主系列の段階に在りては、よし全部ではなくても、エネルギーは、プロトンと電子の放電消滅によつて供給せられて居る。何となれば、質量の眞の損失なくては、星は主系列に沿うて動き行く事は出来ないからである。そして、プロトンと電子が、相互に放電消滅する事から疲れ果て、仕舞ふと言ふ理由はな

いので、此の主系列の状態では星は最後まで續いて行くことを考へる事が出来る。然し明らかに、何かもつともつと、頑強な、つまりエネルギーになりにくい物質が星の中に存存して居る(或はそう言ふ物質が出来て来るのかも知れないが)。故に少くとも或る星にあつては、そう言ふ殘廢物が燃え切れずに残る。それが所謂『白色矮星』なる状態の更に兇猛な格問にかけられるわけだ。

主系列に於ては、吾人は其の原子内エネルギーの法則の單純性を發見する。ラッセルが指したやうに、此の系列にあつては、すべての星はみな、實際的に同一の中心温度を有して居る。私は主系列に於ける星の中心温度として、四千萬度を得た。ラッセルの値はこれより少し低い。

此の中心温度の殆んど一定である事は、ラッセルの論文に出て居るグラフの一つ一つの星によつて、非常に綺麗に示されて居る。(Nature 1925八月八日—一天界一月號参照) 以下の議論は彼の議の追加を見てよい。一つ一つの星の觀測材料の誤差を許す事はむづかしい。又、特別な不一致にどれ位の重きを置くべきかを知る事もむづかしい。故に問題を逆に考へて、主系列に沿ふては星の中心温度は一定で、40,000,000 度であると假定し、それから出て来る眞光度とスペクトル型との關係を見出し、それと、一般の星の統計によつて示めされた關係とを比較して見る。その結果は次表の通りである。

質 量	全光度	視光度	有效温度	型
0.182	11.94	14.5	2550°	< M _d
0.258	10.25	11.6	3210	K ₉
0.512	7.26	7.6	4540	K ₀
0.746	5.93	6.1	3160	G ₄
1.00	4.47	4.5	6290	F ₈
1.58	2.43	2.5	8250	A ₈
2.56	0.50	0.9	10520	A ₀
4.58	-1.38	-0.6	13260	B ₇
11.46	-3.86	-2.4	17460	B ₂
37.67	-6.44	-4.3	22500	O _c
90.63	-8.12	-6.	36200	O

第一行の質量と、假定した中心温度とから、輻射平衡論に依つて、其の全光度(bolometric magnitude)と、有效温度とを計算する事が出来る。視光度になをす爲めには、有效温度に相等する補正をほさねばよい。最後の行のスペクトル型は、私が最も一般に承認せられて居ると思ふ尺度を用ひて、有效温度から換算したものである。上表の第三行と第五行とをすれば、光度とスペクトル型との關係が得られる。これは非常に正確に、觀測材料の統計によつて示される主系列の中心線と一致して居る。此の一致の密接なる事に不適當な重きを置く事なく、吾人は、星辰の此の進化階段即ち主系列に在つては温度は、驚くべき迄

に定常であるを結論せねばならぬ。

或星では例へば V Puppis のやうに毎瓦毎秒 680 エルグもエネルギーの供給を必要とし、又或星では、例へば吾が太陽の如く、毎瓦毎秒 2 エルグのエネルギーの供給を必要とし、さては Krueger 60 と云ふやうに毎瓦毎秒たつた 0.08 エルグと云ふエネルギーの供給しか必要として居ないにせよ、その大小を問はず此れだけのエネルギーを得るには、等しくその温度を約 40000000° の高温にのほさねばならぬ。明らかに、此の臨界的温度に在つては、そのエネルギーの供給は全く言はば『御心任せ』と言つた様な工合である。然らば、此の四千萬度と云ふ温度では、エネルギーは恰も蒸氣が 100 度の水から自由に出るのと同じやうに、物質から自由に出るを考へ事が出来るか？ 私は思ふ、物理學者は、かくの如き驚ろくべき性質を、如何なる今まで承認されて居る法則とも兩立させる事を敢てせぬであらう。けれどもそれは、天文學上の觀測が直面して、主張して居る所のものである。

過 安 定

茲に於て、吾々は、『過安定』と言ふ事に依る他の困難に遭遇する。今、自由に動き得るピストンをもつて居る一つの垂直に置かれた圓筒を考へ、高温の瓦斯をもつて充されて居るとする。これが、より一層星に似寄つたものにする爲めには、熱が他から常に此の圓筒内に供給せられ、同時に同じ量だけの熱がどこかその壁を通つて逃げて行くものと考へねばならない。この場合にピストンは丁度その圓筒内の瓦斯の壓力と釣合ふ所で止まるであらう。此のピストンを少しばかり動かすに、若干、振動した後、其の釣合の状態に歸るであらうが今、ピストンに辨が取り付けてありし、ピストンが下降する場合には餘分の熱が這入つて來、ピストンが上る時には熱の供給が遮斷されるやうに作用するものと考へやう。そうするに、圓筒の壁から絶えず熱が逃げて行くとするに、圓筒は壓縮される時には熱を得、稀薄になる時には熱を失ふと言ふ事になる。かくするに、ピストンに始め極く小さな變位をほこせば、此の機關は動き出し、ピストンの上下運動は段々はけしくなつて行く。私は此の『蒸氣機關』を『過安定』にあると稱ふ。即ち此の場合は、段々安定の位置から遠ざかつて行くと言ふやうな不安定の状態ではなく、常に安定の状態に歸らうとはして居るが段々動力が大きくなるので、振動は、次第に止まるかわりに、いくらかでも大きくなつて行く。扨て、若しも星に或臨界温度があるならば、星の振動は丁度今述べたやうな工合に辨を作用させると言ふ事が考へられるであらう。即ち星が收縮するに其の温度は高くなる。故に星の大部分は臨界温度以上になるから、彌々多くの原子内エネルギーが放出される。星が膨脹する時には、中央部の温度は臨界温度以下に降る。故に熱の供給は止まる。即ち、かくして星は丁度蒸

氣機關のやうな、働きを始める。若し此の機關の力が貧弱であるならば、衰頹力に打ち勝つ事は出来なくて、星は安定に止まるであらう。然し、少くとも光の弱い星——その星に在りては、普通中心部の極く小部分のみが臨界温度以上に保たれて居るが——かゝる星では、過安定の状態が結果するであらう。所で吾々はセフエイドと言ふやうな若干の星を知つて居るが、其れ等の星にあつては、此の理由が、或は何か外の原因かは知らぬが、兎に角、過安定であり、従つて脈動して居る。然しそれ等は普通こちがつた星で、皆巨星であるか、主系列の始まり位する星である。だから實際、此の理論にあてはめるには都合の悪い星である。

私は、始め、臨界温度が40000000度にあると言ふ事を容易に許容するのに反對な論證として、過安定に關する此の難點を據り所とした。けれども此の難點は又一般的難點である。此の不安定になるか、過安定になるかの際さい瀬戸は、あまりに狭いので、星が不安定にも又過安定にも落ちることなく安全に舵取り進むやうに、原子内エネルギーの法則を工夫する事はむづかしい。仕方が無い。で私は他の複雑性を導入する事によつて此の癌を切開したいと思つて居る。私は、今温度なり密度の變化が、すぐにはエネルギー放出の速さを變化しないものと假定する。即ち、その間に數個月、恐らくは、數百年の時間の遅れがあり、故に短週期の變化は何等の影響もないものとする。若し、温度と密度が、後になつて温度や密度で影響される事なくしてエネルギーに變化するやうな消滅し得る物質の成生の速さを、支配するとするならば、かゝる事も起るであらう。

吾人はすでに多くの困難に遭遇した。私は敢て言ふが、吾れ等はそれ等の困難を幾分ゆるめる事は出来る。けれども、かくの如き事では完全に征服する事は出来ない。私は思ふに、成功的な理論と言ふものは屢々、第一着に正しい結果を豫測すべきもので、後でこやかく、新しい複雑性を導入して、繕ひをしたりして、間違つた揣摩臆測を爲すべきではない。原子内エネルギーの法則の組立については、吾人はまだ正しい糸口をもつて居ないやうに思ふ。そして他の説よりも或る説の方が好いと言ふやうな事を言ふ迄には至らないと思ふ。然し、茲では、天文學上の觀測から、尙、如何なる事實を拾ひ集める事が出来るか續けて述べやう。

温度と密度の相關

星の安定度を考へる事に依つて、エネルギーの放出の速さは温度と共に或は密度と共に、或は兩者同時に影響して、増加すると言ふ事が證明し得る。原子内エネルギーの放出の速さを E とし、星からの輻射の速さを L とする。常定の状態に在つては $E=L$ である。今 E が L よりも小さくなつたとしやう。そ

うする星は収縮する。(丁度 $E=0$ にはおいて居るが、ケルビン卿の假説に於てもそうである。)然し、半徑が小さくなれば、 L が、増加すると言ふ事は一般に認められて居る。故にエネルギーの不足は彌々都合悪くなる。 L が、愈々増加すれば収縮は彌々起り、星は愈々ちぢこまる。此の事から星を救助する爲めには、吾人は収縮による温度と密度の増加が、 E の増加を來し、従つて、 E は L よりも大となり、星を釣合の状態まで引き戻すと言ふ風に考へねばならない。不安定の兆しは、崩壊的ではない。そして星のちぢこまりは、ケルビン卿の時間の尺度に比較出来る位の時間に起るであらうが、然し吾人は、ケルビン卿の時間の尺度を捨て、仕舞つて居るので、かくの如き星のちぢこまりに備へねばならない。

ジーンスの理論に於ては、原子内エネルギーの放出は、温度や密度に無關係であるを假定してある。丁度放射能物質の場合と同種のものである。此の見解は又ネルンストも採用して居る。私は、色々違つた星で、 E と L とを釣合にもち來たす、何等の方法もないと言ふ所から、輻射平衡論の始まりから、此の假定を強いて、なけ捨てたい感情をもつて居た。密度の巨きな變化は、 L を2倍乃至3倍に變ぜしめ、そして前に言つたやうに、此の際の L の調節が悪い方向に向くと言ふ事は非常にほんごうらしいだから此の調節が E の變化から來る可き事は必然的である。理論物理學が、星の温度が著るしく、原子内の過程に影響すると言ふ考へに、難點をあたえると言ふ事は眞であるけれども、それは明らかに打勝たねばならぬ難點である。

E が温度及密度に無關係であると言ふ假定は、天文學上の事實に適する望みのない様に見える、融通のきかない規則をあたへるものである。それは、一瓦毎の物質から出て星から輻射されるエネルギーが單に星の年齢のみに據る事を要求する。如何なる點から其の年齢をはかるか明らかでない。いづれにしてもブレイヤーデスコか、ヒヤードスコか、ブレセープと言ふやうな同年齢の星の群の研究は此の假説に一致しない。

質量漸減の證

扱て、今特に、星が其の進化の間に、其の質量を著るしく變ずると言ふ理論を考へて見やう。既に説明した如く、その爲めには、元素の轉換は、長い間にわたつて充分なエネルギーを供給する事が出来ぬので、プロトンと電子とが放電消滅すると言ふ、もつと過激な假説を必要とする。此の質量の變化を赦さなければ、主系列に沿ふて下つて行く星辰の進化は不可能である。星ほしは多分、主系列に達する迄は急激に進化して來たであらう。此の主系列に、星は其の生涯の大部分の間、止まつて居り、それから、白色矮星の状態に移つて行くであらう。此の事は、宇宙物理學に於ては、進化と言ふ事は、顯著な役割を演

じて居ないだらうと言ふ事を意味する。主系列から離れて行く星、即ち白色矮星は、一般に、主系列に近づいて来る星即ち巨星よりも質量が小さいと言ふ事實は、此の主系列の間に、著るしく其の質量を減する事に都合の好い論證である。

巨星の統計的研究も、又此の見界を助ける。最も尠大な状態が、初期にあると假定して、吾人は星の誕生期の近所に於ける平均質量を、K 型及びM型巨星の統計的研究から見出す事が出来る。其の光度の方から、質量を決定するに、最も若い星の90%は、太陽の質量の2.4 倍から、5.5 倍の質量を有して居る事も發見する。故に一般に星全体の質量の平均は、太陽の質量よりも小さい。此の事は強く次の事を暗示する。即ち、多くの星は、大部分、そのもの質量を失つて居るのだ。此の結果は、輻射平衡論の他の結論である、星の質量は、輻射壓が優勢になる丁度際さい範囲内にあると言ふ事とよく一致する。すべての星の質量の平均を、例えば、太陽の質量の三分の一乃至太陽の質量と假定して見るに、輻射壓は全壓力の0,007 乃至0,05 の間にある。之れは明らかに餘りに小さな價である。然し、吾々は寧ろ未だ何等の消耗もない最初の質量を採用すべきである。太陽質量の2,4 乃至5,5 倍の質量は、全壓力に對する輻射壓の比として、0,17 乃至0,35 なる價を與える。これは丁度有效らしい範囲である。

此の理由から私は結論して、星は太陽質量の2 倍よりも小さな質量の時に生れたものではないと思ふ。人は、或は次の如く主張するかも知れない。即ち質量の小さな尠大な星は非常に速く收縮する爲めに、それを見ないであらう。然しそれは何故であらう？ それ等は決してそのエネルギーの貯えをそんなに早く汲み盡して仕舞ふものではなく、一層遅く進化して行くべきではないか。

星團内に於ける同年齡の星

然し、茲に同じ様に強い、他の方面からの論證がある。それに就いて次に論述しやう。先づ、あるきまつた光度と質量の範囲を通つて、星が進化して行く時間を示す表を示さう。これは $\frac{dM}{dt} = -\frac{L}{C^2}$ なる式によつて計算する事が出来る。茲に L エルグと言ふ輻射となつて、空間に出て行く質量は L/C^2 瓦であるからである。然るに L は、質量と光度の相關法則に依つて、 M の函數として表はす事が出来るので、上の方程式は M を時間 t の函數として積分する事が出来る。次表は其の結果である。

質 量(太陽=1)	絶 對 全 光 度	其期間の繼續時間
自 ∞ 至35	< -5	.038 $\times 10^{12}$ 年
自35 至10	自-5 至-2,5	.065 $\times 10^{12}$ 年
10 — 3.73	-2.5 — 0	.214

3.7 — 1.73	0 — 2.5	.93
1.73 — 0.92	2.5 — 5	5.21
0.92 — 0.53	5 — 7.5	36.3
0.53 — 0.31	7.5 — 10	281.
0.31 — 0.18	10 — 12.5	2190.

此の表は先づ、内部温度が一定にさまつて居る、主系列にあてはまる。然し又充分な近似として巨星にも應用が出来る。これに依つて見れば、はじめ質量が如何に大であらうとも、一兆年(10^{12})の後には太陽の質量の二倍以上の質量を止むる事は出来ない。故に、若し或る星團が2と言ふ質量、従つて、眞光度2等より大きな星を含んで居るならば、其の星團は一兆年よりも古い事は出来ない。然し、上の表を下まで見渡して見るに、一兆年と雖も、光の弱い星の進化の年數に比べると、物の數にもあたらないと言ふ事がわかる。故に、若し、星團が5等乃至7等の星をも含んで居るならば、此等の星は、實際的に、今もつて居る質量や光度をもつて生れたものと考へて差支へない。多くの星團には光の強い星と光の弱い星と同時に含んで居る事は知られて居る。吾々の上の論證に依れば、その中に含まれて居る光の弱い方の星は、あまりに著しく進化する事は出来なかつたわけである。若し、星團内に於ける矮星の進化を打消きねばならぬならば、一般に矮星の進化を假定する如何なる點があるか。いつれの場合にしても、星は2よりも小さな質量で生れる事は出来ないと言ふ考へは、撤去せねばならぬ様に思はれる。

星團の觀測は吾々の結論に矛盾するやうに見えるけれど、吾々は其の矛盾が深酷なものでないと言ふ事の爲めに、幾分勇氣をこりかえすのである。私ばヘルツスブルグの研究からヒヤーテスミカ、プレヤードスミカ、プレセープミ言ふやうな進行星團は、確かに光の弱い矮星の全くの一部分と云ふやうなものを含んで居ないと言ふ事を知る。この光の弱い矮星は7等と言ふ所で突然になくなつて居り、それ以下は全く含んで居ないか、極くまれである。又球狀星團に於て、矮星は巨星に比して、一般に吾が銀河系に於ける割合よりも遙か小さいと言ふ證據も見える。故に、よく式に書き表す事は出来なかつたけれども、間壽命の星の星系に共存する強量と弱量間のちがいに關して、恐らく何か論じ足らぬ所があるだらうと思はれる。

吾が銀河系に在つては、吾々はあらゆる年齢の量の集まりを想像して居るのであるが、各段階の星の數は其の段階の星の數は其の段階に於ける星の持續壽命の長さに比例するべきである。故に上に掲げた表の最後の行の數字は、其れ相等の光度の限界(第二行)にある星の星に比例するはずである。然し、此の豫

想は、ただ質量が2よりも小さな星についてしか、あてはまらない。質量が2よりも大きな星については、その数は非常に小さく出て居るにちがいない。何となれば、多くの星は質量が2乃至5の所から出發するからである。かくの如き方法で豫言された、眞光度の分布数は、觀測の統計とよく一致する。

質量の漸減に依つて、星が進化して言ふと言ふ、理論を支える、他の試ろはフオーグトミによつて試ろみられた。それは表からすぐに判る事であるが、若し二つの星が、著るしく違つた質量をもつて、出發するならば、其の質量の比は、時間が段々たつにしたがつて、次第に1に近づくであらう。故に、聯星系に在つて、大きな質量の比を有するものは、進化の階段に於て、早いものゝみにあるを考ゆべきである。そして、聯星系のスペクトル型が後期のものになるに従つて、其の質量の比はに近付いて行くはずである。此の事は觀測に依つて確かめられて居るやうに思はれる。

質量の漸減が、聯星系の力學に及ぼす影響から、今まで説明されて居ない、聯星系の兩分星の距離及軌道の離心率に關する問題も、恐らくは明らかになりはしないかと思へるかも知れない。此の事はジーンズ及スマートによつて研究されて居るが、然し、其の結果は失望的であつて、新しい此の理論は、此の問題に何等の説明も、ち來さない。この他には、私は此の理論場に都合の好いもの、又都合の悪いもの、も今まであらわれて居る色々な他の研究からは、まだ拾集する事が出来ない。

コム ト ン 效 果

純粹物理學の進歩と天文學の間の密接な關係の説明として、コムトン效果の發見が、星辰エネルギーの原子内源泉に關して、眞の難點であつた所のものを、救済すると言ふ事を述べる事が出来る。量子説によれば、水素からヘリウムが構成される時に出す輻射は、波長 $0.00041A. U$ のものであり、プロトンと電子とが放電消滅する時に出す輻射は、波長 $0.000013 A. U$ のものでなくてはならぬ。然らば如何なるカラクリで、かくも波長の短かいものが、星辰内の普通の熱の形に轉換されるであらうか。普通の吸收係数は、波長の三乗にしたがつて小さくなる。だから、上の量子の第二のものは、恐らく、星を透つて遂に世界の果までも行つて仕舞ひ、星の物質に依つて吸收され、有効な熱に變はる何者も残らないのではなからうか。電子に依る分散係数が波長が、小さくなるにしたがつて、減少するには、減少するが、吸收係数はさう早く小さくならないので、それは屢々分散されるであらう。然し分散に依つて、波長が變化せぬ限り、此の事は上に述べ難點を切り抜ける助けにはならない。所が今や、コムトン效果の理論は、波長は分散の後では $0.024(1 - \cos\theta) A. U$ だけ増加すると言ふ事を語つて居る。故に、其の始めの波長が如何に短からうとも、一回可成分散しただけで、波長はただちに普通の γ 線位の輻射になるのである。此の際、エネルギーの大部分は電子の放出のエネルギーとなり、電子は非常に巨きなエネルギーをもつて飛んで行く。かくして如何にして上に言つたやうに通常に波長の小さな輻射のエネルギーが普通の熱にエネルギーに變つて行くかを見るに、何等の難點もなくなつたわけである。